

# ネット炎上の発生要因を有向リンクのトポロジ構造に関連付ける新たなネットワーク基礎理論の構築

代表研究者 會 田 雅 樹 首都大学東京 システムデザイン研究科 教授

## 1 はじめに

情報ネットワークは単なる人と人の通信手段という枠組みを大きく超えて我々の生活に浸透し、高い利便性や効率性を持つ社会システムが実現している。日常生活に於いて、既に情報ネットワークのない社会は考えられない。それどころか、今や人間の生命や財産に関わる事柄まで情報ネットワークに強く依存していて、それが停止したときの社会的影響が日増しに大きくなっている。例えば東日本大震災後の緊急支援物資の物流システムにおいて、情報ネットワークの障害が原因で避難所の需要に合った物資の配送を困難にしたことは記憶に新しい。このように、情報ネットワークは常に安定運用することが期待されるクリティカルインフラとなっているのである [1]。

情報ネットワークの日常生活への浸透は、個人間のコミュニケーションや個人レベルの情報発信を飛躍的に活性化し、社会活動の利便性や効率性を向上させている。その一方で、実世界とサイバー空間の密接な結び付きにより、人間の群集心理をあおって実世界に影響を与えたり、ネットアクセスの過度な集中により情報ネットワークの安定運用に支障を来すなどの問題が実際に起こっている。特に、情報ネットワークによる情報流通の迅速性や匿名性は、世界各国で起きている組織的なテロ行為などの犯罪に利用されているだけでなく、これまで情報統制による開発独裁を敷いてきた国家に対して、その統治体制さえも揺るがしかねない力を持ち始めている。また、人間以外にも例えば金融市場のアルゴリズム取引など、ネットワークに接続されたコンピュータが情報ネットワークを介して実社会の経済に大きな影響を与えるようになってきている。あらゆるものが情報ネットワークに接続される IoT 時代の本格的な到来を控え、情報ネットワークの安定運用は、もはや情報ネットワークそれ自身だけでなく、それにつながる人や‘もの’まで含めて「拡大されたネットワークモデル」を対象にして相互の影響を考察しなければならない状況である。このように、良くも悪くも社会と不可分に結び付いた情報ネットワークでは、社会的な悪影響を緩和しつつ安定的に運用することが重要である。社会の状況と結びつくことで「拡大されたネットワークモデル」の構造は複雑化し、悪影響が拡大する速度も爆発的に速くなることで、適切な対処が難しくなると予想される。しかし、元々のこれらの状況は情報ネットワークの影響力によって生じているので、我々が直接オペレーションできる対象が情報ネットワークに限定されていたとしても、何らかの有効な対策を講じることができるとは必ずである。少なくとも、緊急時に最悪の事態に陥らないよう、個別の事情に特化した本質的な対処がなされるまでの間、情報ネットワーク側で何らかの激変緩和措置を実行することができるかもしれない。そのために必要なことは、情報ネットワークとそれにつながる人々の振舞いを同時に考慮し、情報ネットワークや人々との相互作用とその影響を理解することができる基礎理論の確立である。これまでも情報ネットワーク分野では待ち行列理論や最適化理論など、様々な基礎理論に基づいて技術開発が行われてきた。それらの基礎理論の重要性は今後も変わらないが、新たに重要性を増した「拡大されたネットワークモデル」において、社会を巻き込んで爆発的に拡大する事象の発生要因を理解し、その対策技術の検討を可能にする新しい基礎理論が必要とされているのである [1, 2]。

## 2 社会ネットワーク上のユーザダイナミクスのモデル化

### 2-1 ネットワーク上の振動モデル

$n$  個のノードから成るネットワーク構造を  $n \times n$  の正方行列で表現して、その固有値・固有ベクトルなどからネットワーク構造やダイナミクスを調べる方法は、スペクトルグラフ理論として知られている (1)。一般に、正方行列が対称 (行と列の入替えで不変) ならば多くの都合の良い性質が成り立つため、スペクトルグラフ理論は対称行列で表現可能な無向グラフに関して多くの有用な結果が知られている。一方で、非対称行列で表現される有向グラフへの適用は難しく、Google の PageRank はその数少ない成功例の一つである。

人を対象としたネットワークでは、人と人の関係の強さは非対称であり、人をノード、人と人の関係をリ

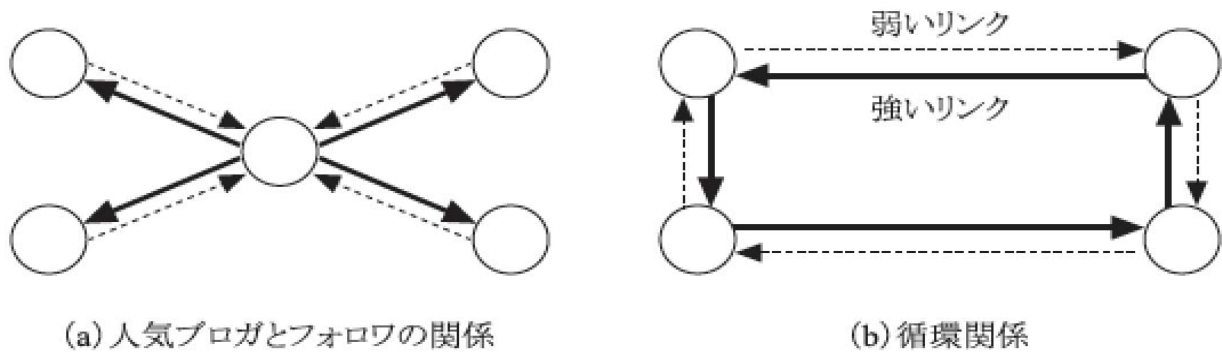


図1 非対称相互作用の分類

リンクとすることで非対称行列で表現される有向グラフとなる．しかし，有向グラフであっても対称行列で表現可能な性質の良いクラスが存在する．図1は非対称性の分類の典型例を示したもので，図(a)は例えば有名ブロガとそのフォロワの関係などに見られる構造であり，図(b)はじゃんけんのような関係である．どちらも有向グラフであるが，(a)はリンクの非対称性をノードの特性（中央のノードが強く，周囲が弱い）に還元することで，リンクの対称化が可能である(3)．一方，(b)の関係はノードの特性に還元できない純粋なリンクの性質である．有向グラフに関するスペクトルグラフ理論の成功例は，(a)のような「対称化可能なクラス」を対象としたものである．

対称化可能な有向グラフに関連して，かつネットワーク上で人と人の影響の伝搬を表現するモデルとして，ネットワーク上の振動モデルを考えよう．各ノード  $i$  が時刻  $t$  で変位  $x_i(t)$  という状態量を持ち，隣接ノードと自分の状態量の差に比例して，隣接ノードの状態に合わせようとする復元力が働くモデルである．図2は一次元ネットワークの場合を図示したものであるが，一般のネットワークトポロジーでも同様である．まず，このモデルが極めて自然でかつ基本的であることを説明したい．全てのノードの状態量  $x_i(t)$  が等しい場合，ノード間の影響がない安定状態であると考えるのは自然である．次に，ノードの状態量  $x_i(t)$  が隣接ノード間で異なる場合，その「差」が大きいほど安定状態に向かう大きな復元力が働くと考えるのも自然である．もし状態量の「比」によって復元力が働く場合も，適当に対数を採れば「差」として考え直すことができる．復元力の強さが「差」に関するどのような関数型であっても，安定状態の回りでテイラー展開すれば，第一次の近似として「状態量の差に比例」した復元力が現れる．したがって，図2のようなばねのモデルは，多くのモデルが共通して含んでいる特性を記述する基本的なモデルなのである [2, 3]．

この振動モデルを分析すると，運動方程式に「対称化可能なクラス」の有向グラフに対応する非対称行列が現れる．これは，ノード間の影響が非対称であっても，その非対称性はノードの特性に還元できることを

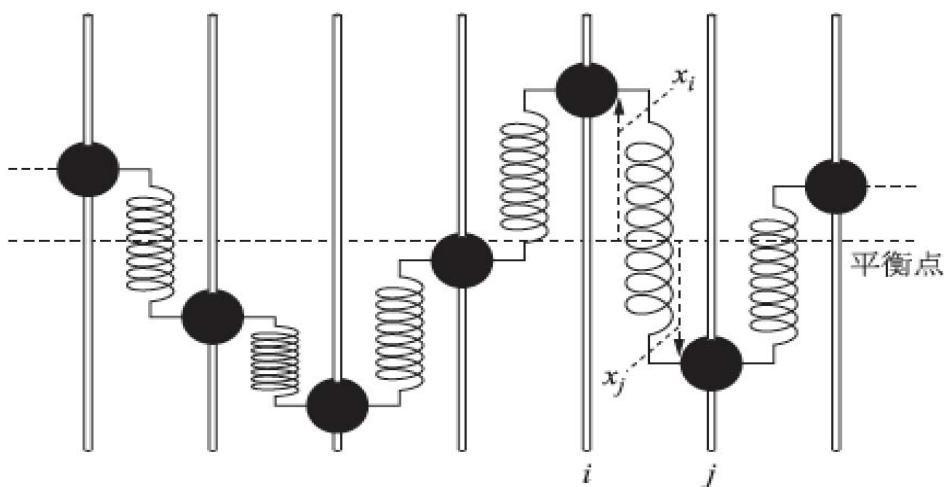


図2 ネットワーク上の振動モデル

意味しており、この場合のノードの特性はノードの質量に対応する。また、対応する有向グラフが「対称化可能なクラス」であることは、ノード間に働く力がニュートンの第三法則（作用・反作用の法則）を満たすことと等価である。これらの理由で有向グラフを対称化することができ、対称行列を対角化する（実対称行列は常に対角化可能）ことで運動方程式を解くと、 $n$  個の独立な調和振動子（普通の振り子）の運動方程式に分解することができる。この数はノード数と等しいが、決して各ノードが独立な振り子になっているわけではないことに注意してほしい。各ノードは図 2 のように密接に関連しているが、ネットワーク全体として  $n$  種類の振動モードが現れ、それぞれが独立な振り子と等価な振舞いをする、という意味である。

## 2-2 ネットワークの振動エネルギーとノード中心性

このように「対称化可能なクラス」に属する振動モデルは図 2 のような普通の力学モデルに対応し、各ノードの振動解  $x_i(t)$  は独立な振り子による振動の重ね合わせで表現され、その振舞いは完全に理解することができる。しかし、振動解は一般に複素関数であり、実部のみを取り出したとしても負の値をとる場合もあり、ノードの変位  $x_i(t)$  がどのように具体的な概念と結び付くか考える必要がある。具体的な話に入る前に、ノード中心性の概念に触れておく。ノード中心性とは、ネットワークの中で特定のノードがどのくらい重要な働きをしているかを定量的に表したもので、重要性の基準の採り方によって様々なノード中心性の概念が存在する。次数中心性とは、ノード次数（ノードにつながっているリンクの本数）を中心性の指標としたもので、ノード次数の高いノードほど情報の伝搬に強く寄与することを評価した指標である。媒介中心性とは、任意の 2 ノード間の最短経路が自ノードを通過する割合を中心性の指標としたもので、多くの最短経路を中継しているノードが高く評価される指標である。また、Google の PageRank もノード中心性の一つであり、振動モデルにおけるノードの質量と関連している。

振動の強さを非負の値によって表現するために、ノードの振動エネルギーを考えてみよう。すると、ノードごとの振動エネルギーがノード中心性の概念に結び付くのである。全てのリンクの重みを 1 としてノードごとの振動エネルギーを考えると、次数中心性に比例した値を与え、リンクの重みを任意の 2 ノード間の最短経路の通過本数で与えてみると、ノードごとの振動エネルギーが媒介中心性に関連する値を与える [3]。このことは、異なるノード中心性の概念を共通の枠組みで理解したことになる。また、ノードの変位  $x_i(t)$  はそれ自体で物理的な意味があるわけではなく、ノードの運動エネルギーを考えることでネットワーク内でのノードの働きの強さを表現することになる。ただし、ノードの変位  $x_i(t)$  を介してノード中心性を理解することは決して無意味ではない。ノードのアクティビティがネットワーク内を伝搬するには、その背後にノードの変位  $x_i(t)$  に基づく波の構造が必要なのである。

更に重要なのは、ノードの振動エネルギーがノード中心性の拡張概念に結び付くことである。リンクの重みやノードの重みを変えることで、様々な中心性の尺度を作り出せるのはもちろん、運動方程式の初期条件を変えることで、特定のノードがアクティビティの起点となった場合のノード中心性なども自然に得られる。また、一般に振動現象とは運動エネルギーとポテンシャルエネルギーが入れ替わりながら変化することから、ノードの運動エネルギーのみを考えることにより、ネットワーク上のノードのアクティビティの伝搬の経時変化を記述することもできる [3]。

## 3 ネット炎上のモデル化と対策

### 3-1 ネットワーク上の振動モデルによるネット炎上発生メカニズムの理解

前章では、「対称化可能な有向グラフ」で記述可能なネットワーク上の振動モデルは、図 2 のような普通の力学モデルで表現でき、本質的に  $n$  個の独立な振り子の運動に分解されることを述べた。このことは、幾ら時間が経過してもネット炎上のようなノードのアクティビティの強さ（ノードの振動エネルギー）が発散するような振舞いは出現しないことを示している。ここでは、ネットワーク上の振動モデルを「対称化可能な有向グラフ」を超えて一般の有向グラフに拡張することを考える。

一般の有向グラフに対応する振動モデルでは、ノード間の復元力に対してニュートンの第三法則が成り立たない。つまり、図 2 のような普通の力学モデルで表現できるような現実世界の振動現象には対応せず、ネットワーク内での仮想的な振動モデルを扱うことになる。ノードの変位を並べた列ベクトル  $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$  に対して、時間発展を表す運動方程式（波動方程式）は

$$\frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} = -(\mathcal{L}_0 + \mathcal{L}_1) \mathbf{x}(t) \quad (1)$$

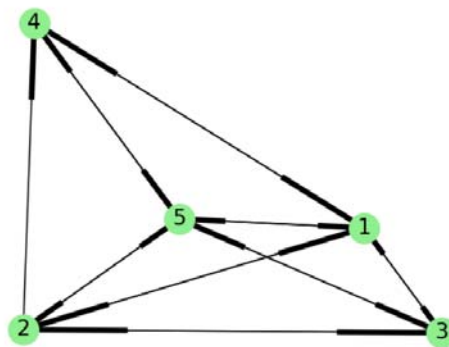
と書ける [2]. ここで,  $L$  を有向グラフ上の二階差分の操作を表す行列 (ラプラシアン行列) としたとき,  $L_0$  と  $L_1$  は  $L = L_0 + L_1$  のようにラプラシアン行列を分解したもので,  $L_0$  が対称化可能な有向グラフのラプラシアン行列,  $L_1$  はそれ以外の, ノード間に高々一方向しかリンクのない有向グラフのラプラシアン行列である.  $L_0$  は「対称化可能な有向グラフ」であるが,  $L_1$  が存在することによって独立な調和振動子への分解が阻害され, 複雑な振舞いをするようになる.

前章では  $L_1 = 0$  ( $0$  はゼロ行列) となる状況を考えており,  $L_0$  は対称化可能なので固有値が実数であることが保証されていた. しかし,  $L_1 \neq 0$  となる状況を考えると  $L = L_0 + L_1$  の固有値は一般に複素数になってしまう. ネットワーク上の振動現象が時間とともに減衰する効果も取り入れると, 一般の有向グラフ上での振動モードの解の構造は

$$\exp[-(\text{減衰の強さ})] \times \exp[\pm i(\mathcal{L} \text{ の固有値の関数})]$$

となる. ここで  $i = \sqrt{-1}$  である.  $L$  の固有値が実数ならば 2 番目の指数関数は純粋な振動を表すが, 固有値が複素数になると 2 番目の指数関数の中身が純虚数にはならず, 実部が出現する. この影響が減衰の強さを超えれば, 解が時間とともに指数関数的に発散する. このことは, ネット炎上のような爆発的なダイナミクスが「拡大されたネットワークモデル」から発生するメカニズムを表現するものであると解釈することができる [2, 4].

図 3 は, 対称化可能な有向グラフ  $L_0$  に, ノード間に高々一方向のリンクを持つ一方向リンクグラフ  $L_1$  を加えて, 一般の有向グラフを表現したものである. このとき, 一方向リンクグラフのリンクの重みをパラメータ  $\epsilon$  に比例するように決め,  $\epsilon$  を調整することで,  $\epsilon = 0$  のときに対称化可能グラフとなり,  $\epsilon$  を大きくすると対称化可能グラフから離れていくように調整可能なモデルとしている. このモデルの場合,  $\epsilon = 1.66$  を超えると発散が起こる.



$$\begin{bmatrix} 11 + \epsilon & -3 & -3.33 & -1.66 & -3 - \epsilon \\ -2.25 & 5.75 + 2\epsilon & -1.25 - \epsilon & -\epsilon & -2.25 \\ -10 & -5 & 23 + \epsilon & 0 & -8 - \epsilon \\ -2.5 - \epsilon & 0 & 0 & 5.5 + \epsilon & -3 \\ -2.25 & -2.25 - \epsilon & -2 & -1.5 & 8 + \epsilon \end{bmatrix}$$

図 3 対称化可能グラフに一方向リンクグラフを重ねたネットワークモデル

### 3-2 ネット炎上の対策技術

発散が生じる仕組みが分かると、それを起こさない条件を考えることでネット炎上の防止技術を検討することができる。

有向グラフが「対称化可能な有向グラフ」であることは、発散が起こらないための十分条件である。そのためには  $L_I$  の影響を排除するような操作ができればよい。実は  $L = L_0 + L_I$  の分解は一意的ではないので、操作のしやすい都合の良い分解を選ぶことができる。具体的には、ネットワーク上に閉路を考え、全ての閉路でリンクの重みの積が右回りと左回りで等しければ「対称化可能な有向グラフ」である。そのためリンクの重みの調整は、閉路上のどのリンクに対して実施してもよい。この任意性がラプラシアン行列の分解の自由度と関連している。

但し、この方法を実現するためには、社会ネットワーク構造を表すラプラシアン行列  $L$  が既知である必要がある。すなわち、社会ネットワークの構造を、ユーザ間のリンクの有無やリンクの双方向のおもみの大きさが既知である必要がある。しかし、一般に社会ネットワーク構造の詳細を知ることは難しいため、 $L_I$  に対応するリンクの切り出しと調整によるネット炎上対策技術は実現が難しい。

社会ネットワークのトポロジ構造がわかっていなくても実現可能なネット炎上対策技術として、ネットワーク上の減衰振動モデルに於いて減衰係数を調整する方法が考えられる。一般に、減衰係数を大きくすることで、固有振動数に複素数が現れることを防止することができる。このため、ネット炎上発生の際に、減衰係数を増加させる方向に調整することで、ネット炎上の拡大を抑えて正常化する効果が期待できる [5]。

更に、ネット炎上が実際に発生する前に予兆を検知して対策を講じることができる可能性がある。ネット炎上はラプラシアン行列  $L$  の固有値が複素数になることから発生するが、固有値を解を持つ特性方程式

$$\det(L - \lambda I) = 0 \tag{2}$$

を考えると、固有値が実軸上に解を持たなくなる瞬間、固有値は重解となる。また、実軸上に解を持たない固有値は、必ず複素共役の形の対で出現する。このことから、固有値が実軸上に解を持たなくなる過程で、対応する二つの固有値が実軸上で近づいていくことがわかる。

図4は、図3に示したネットワークモデルに於いて、一方向リンクグラフのパラメータ  $\epsilon$  を 0 から発散の起きる 1.66 の直前まで変化させた際の、ラプラシアン行列の固有値（ノード数と同じ5個存在）の変化を示したものである。

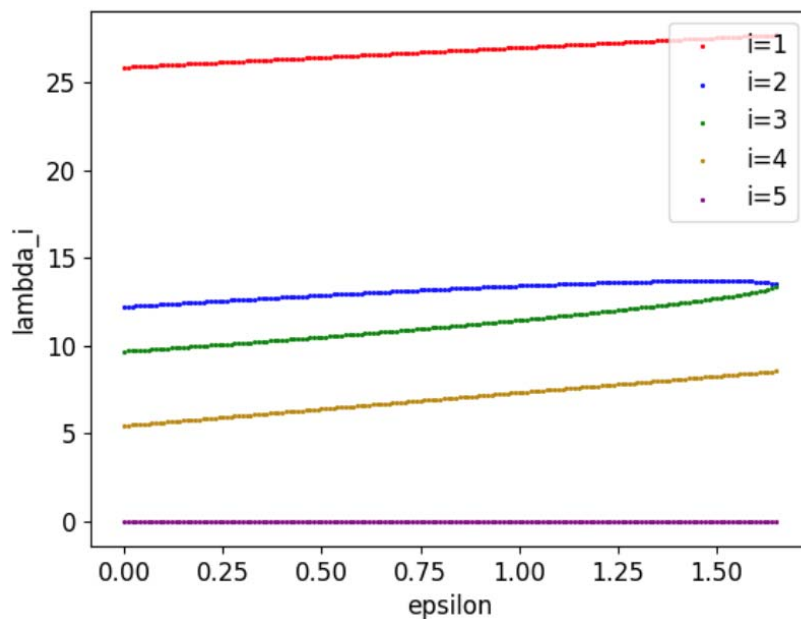


図4  $\epsilon$  を変化させたときのラプラシアン行列の固有値の変化

図4では、青と緑で示した固有値が  $\varepsilon$  の増加とともに近づいていることがわかる。  $\varepsilon = 1.66$  において複素数となる固有値は、この2つの固有値のペアである。

ラプラシアン行列の固有値は、固有振動モードの振動数に関連しているので、極めて固有振動数の近い振動モードが現れることになる。また、これに対応する固有ベクトルは、平行に近づいていく。このことから、固有ベクトルで展開したときの係数の値が大きくなる傾向がある。したがって、実軸上に解を持たなくなりつつある固有値のペアは、実数のままの留まる固有値に比べて、振動モード振幅が極端に大きくなり、しかも非常に近い固有振動モードを持つことになる。

非常に近い振動モードの重ね合わせることによって、両者の振動数の差できまる非常に低い周波数の「うなり」が発生する。このうなりは、振幅も大きいため、他の振動モードと重ね合わせても容易に識別が可能である。したがって、ネット炎上の際には、予兆として振幅の大きい低周波の「うなり」の現象が観測されるはずである。

図3に示すネットワークモデルに於いて、 $\varepsilon$  を変化させたときのあるノード（図3のノード1）の振動の様子を図5～図9に示す。

### ノード1の振動

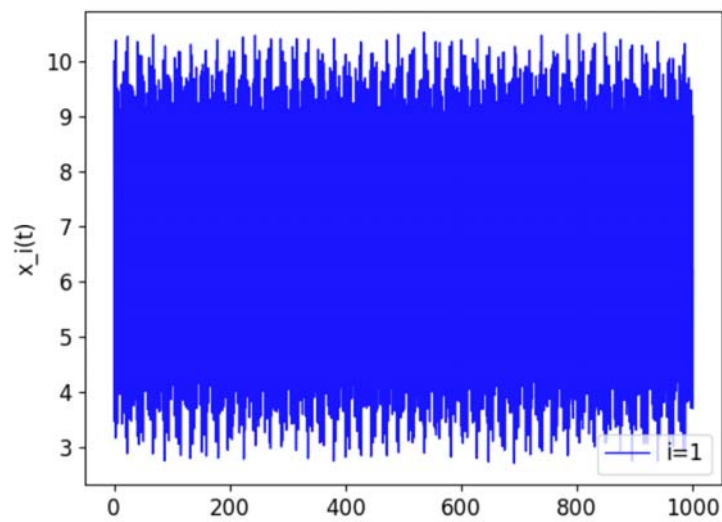


図5  $\varepsilon = 1.00$  のときのノード1の振動の様子

### ノード1の振動

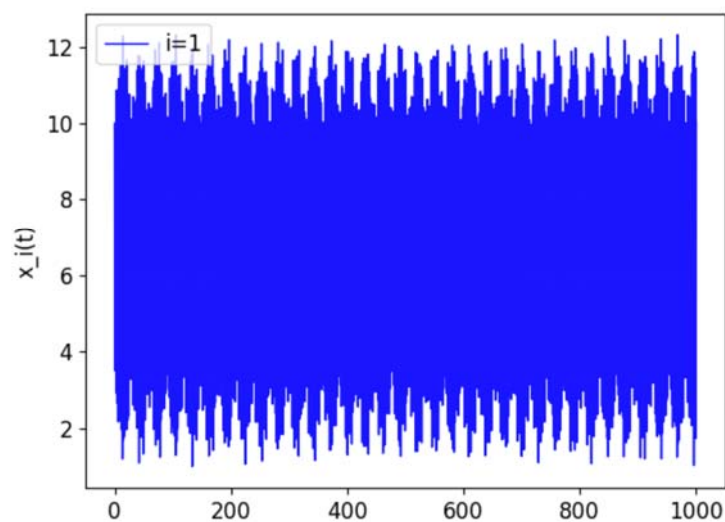


図6  $\varepsilon = 1.30$  のときのノード1の振動の様子

### ノード1の振動

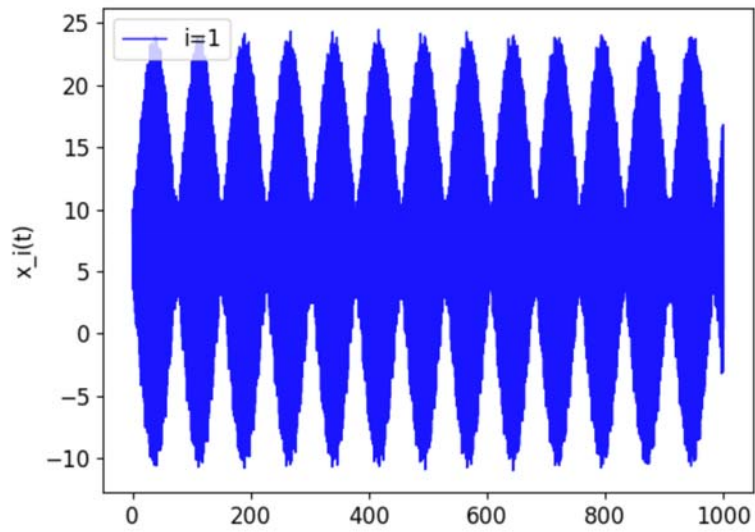


図7  $\epsilon = 1.60$  のときのノード1の振動の様子

### ノード1の振動

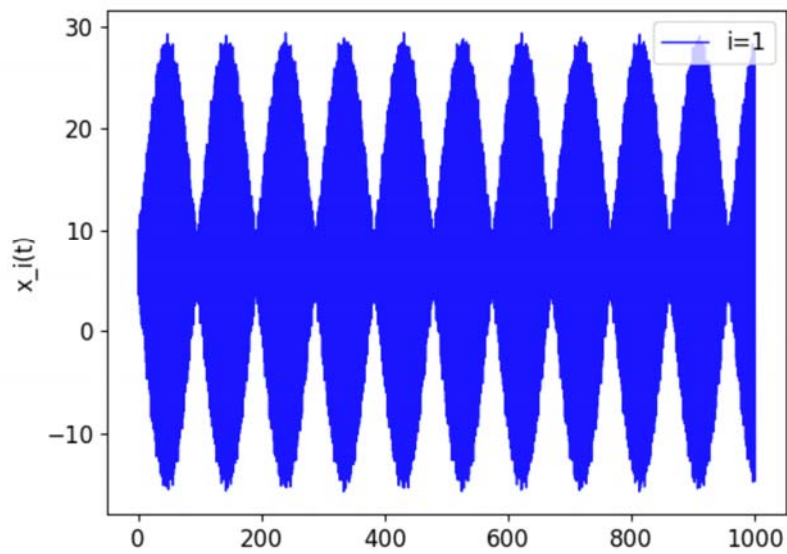


図8  $\epsilon = 1.60$  のときのノード1の振動の様子

図5～図9から、 $\epsilon$ の値が1.66に近づくにつれ、低周波のうなりが出現し、そのうなりの振幅がどんどん大きくなっていることがわかる。これは、ネット炎上が発生する予兆を検出する上で好都合な性質である。

このことからわかるように、ネット炎上が発生する前に、その予兆を検出し、ネット炎上を未然に防ぐことのできる対策技術の実現が期待できる。

## ノード1の振動

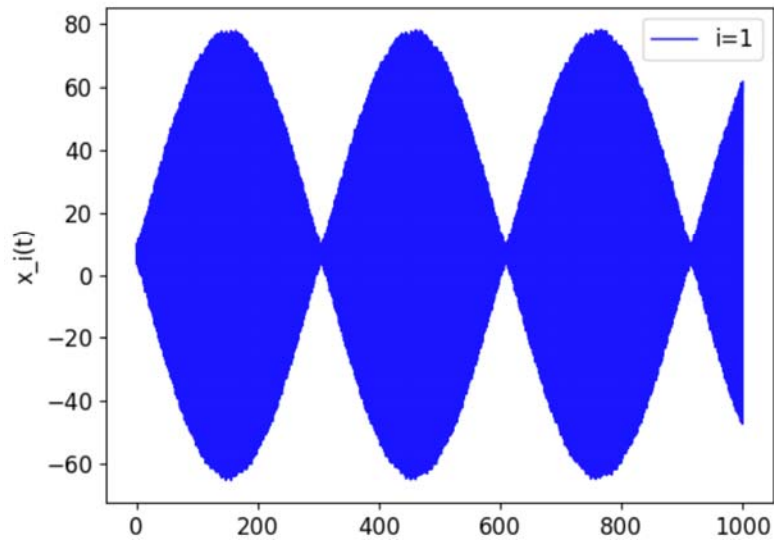


図9  $\varepsilon = 1.66$  のときのノード1の振動の様子

### 4 社会ネットワーク上のユーザダイナミクスのモデル化に関するその他の進展

社会ネットワーク上の振動モデルを用いた研究のその他の展開として、社会ネットワーク構造を推定する研究を進めた。

社会ネットワーク構造を知ることは、対応するラプラシアン行列を知ることと等しい。行列は、その固有値と固有ベクトルを用いて表現できるので、固有値と固有ベクトルがすべてわかれば、元のラプラシアン行列を知ることができる。社会ネットワーク上のユーザダイナミクスを分析することで、ラプラシアン行列の固有値と固有ベクトルを直接観測する方法がネットワーク共鳴法である。これまで、ラプラシアン行列の固有値の推定法を開発してきたが、今回の研究で固有ベクトルを決定する方法を開発した [6]。

固有ベクトルの成分のうち、ネットワーク共鳴法で得られるのはベクトルの成分の絶対値である。固有ベクトルを再現するには、各成分の符号を適切に決めなければならない。n本のn次元ベクトルについて、その成分の符号の組み合わせは $2^n \times n$ だけ存在し、効率的なアルゴリズムが求められていた。今回の研究で、符号決定を多項式時間で実行するアルゴリズムの開発に成功した [7]。

社会ネットワークのラプラシアン行列は、一般にスパース性がある。つまり行列成分の殆どは0である。これは世の中の全体の人口に対して、個人の持つ知人の数は非常に少ないということに対応する。スパースなデータを推定するとき、圧縮センシングと呼ばれる少ないデータ数から推定を可能とする方法が存在する。これを適用すると、 $n \times n$ のラプラシアン行列を推定する際に、本来はn個の固有値とそれらに属するn個の固有ベクトルの情報が必要なところを、より少ない固有値・固有ベクトルの組から社会ネットワーク構造を推定することが可能となる [8]。

社会ネットワークの構造が完全にはわからない状況でも、社会ネットワーク上のダイナミクスに対して普遍的に成立するような性質を見出す試みとして、ランダム行列を用いた検討を行った。ランダム行列とは行列の成分を乱数で与えるもので、本研究ではラプラシアン行列の条件を満たす範囲内で行列成分を乱数で与えたネットワークの性質を考察した。ラプラシアン行列がランダム行列であっても、その固有値は統計的に規則性を持つことが知られている。これを利用すると、ラプラシアン行列の固有値によって特徴づけられるダイナミクスについて、社会ネットワーク構造を完全に特定できなくても、ある程度普遍的な特性を予測することができる [9]。



## 【参考文献】

- [1] 会田 雅樹, ``来るべき超ネットワーク化社会を支える新たなネットワーク基礎理論の胎動," 電子情報通信学会誌, vol. 100, no. 12, pp. 1379-1384, December 2017.
- [2] Masaki Aida, Chisa Takano and Masayuki Murata, ``Oscillation model for describing network dynamics caused by asymmetric node interaction," IEICE Transactions on Communications, vol. E101-B, no. 1, pp. 123-136, January 2018.
- [3] Chisa Takano and Masaki Aida, ``Underlying mechanism of different node centralities based on oscillation dynamics on networks," IEICE Transactions on Communications, vol. E101-B, no. 8, August 2018. (in press)
- [4] Masaki Aida, Chisa Takano and Masayuki Murata, ``Dynamical model of flaming phenomena in on-line social networks," IEEE/ACM International Conference on Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2017), pp. 1164-1171, Sydney, Australia, July/August 2017.
- [5] Kouichi Nagatani and Masaki Aida, ``Flaming countermeasure technology for online social networks based on the damped oscillation model," The 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2018), September 2018.
- [6] Satoshi Furutani, Chisa Takano and Masaki Aida, ``Method for estimating the eigenvectors of a scaled Laplacian matrix using the resonance of oscillation dynamics on networks," IEEE/ACM International Conference on Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2017), pp. 615-618, July/August 2017.
- [7] Naoki Hirakura, Chisa Takano and Masaki Aida, ``Efficient orthogonalizing the eigenvectors of the Laplacian matrix to estimate social network structure," The 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2018), September 2018.
- [8] Shun Sugimoto and Masaki Aida, ``Estimating the structure of social networks from incomplete set of observed information by using compressed sensing," IEEE Latin-American Conference on Communications (IEEE LATINCOM 2017), November 2017.
- [9] 亀山 元, 作元 雄輔, 高野 知佐, 会田 雅樹, ``ランダム行列の普遍性を利用した社会ネットワーク上の情報伝播特性の分析," 電子情報通信学会 インターネットアーキテクチャ研究会, 信学技報 IA2017-62, 2017年12月.

## 〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
A new model of flaming phenomena in on-line social networks caused by degenerated oscillation modes	International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	2018年9月
Flaming countermeasure technology for online social networks based on the damped oscillation model	International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	2018年9月
Efficient orthogonalizing the eigenvectors of the Laplacian matrix to estimate social network structure	International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications	2018年9月
社会ネットワーク構造推定のためのLaplacian行列に関する固有ベクトルの効率的な直交化法	信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, 信学技報 CQ2017-111	2018年3月

ネットワーク上の減衰振動モデルに基づくネット炎上対策技術	信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, 信学技報 CQ2017-112	2018年3月
縮退した振動モードから生じるネット炎上モデルの初期位相に関する考察	信学会 ネットワークシステム研究会, 信学技報 NS2017-157	2018年3月
ネット炎上を含むネットワーク上の爆発的なユーザダイナミクスのモデル化と対策	信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, 信学技報 CQ2017-92	2018年1月
ランダム行列の普遍性を利用した社会ネットワーク上の情報伝播特性の分析	信学会 インターネットアーキテクチャ研究会, 信学技報 IA2017-62	2017年12月
ネットワーク上の相対論的量子力学	信学会 情報ネットワーク研究会, 信学技報 IN2017-54	2017年12月
Estimating the structure of social networks from incomplete set of observed information by using compressed sensing	IEEE Latin-American Conference on Communications	2017年11月
縮退した振動モードから生じる新しいネット炎上モデル	信学会 ネットワークシステム研究会, 信学技報 NS2017-80	2017年9月
Dynamical model of flaming phenomena in on-line social networks	IEEE/ACM International Conference on Social Networks Analysis and Mining	2017年7月
Method for estimating the eigenvectors of a scaled Laplacian matrix using the resonance of oscillation dynamics on networks	IEEE/ACM International Conference on Social Networks Analysis and Mining	2017年7月